ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, 2022, том 41, № 3, с. 49–56

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 662.215.5

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СМЕСЕЙ ОКТОГЕНА С АЛЮМИНИЕМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ МЕТОДОМ РАЗРУШАЮЩЕЙСЯ ОБОЛОЧКИ

© 2022 г. А. В. Дубовик*

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: a-dubovik@mail.ru*

Поступила в редакцию 23.07.2021;
после доработки 16.08.2021;
принята в печать 20.08.2021

На примере смесей октогена с порошками алюминия различной дисперсности выполнен приближенный теоретический анализ метода испытаний твердых взрывчатых веществ (ВВ) на чувствительность к механическим воздействиям, известный как метод разрушающейся оболочки (РО). Для проведения расчетов критических параметров инициирования взрыва во время снятия нагрузки на ВВ (давлений, скоростей вещества и пр.) разработана физическая модель механического поведения смеси при трении в потоке разрушенного вещества и получено аналитическое выражение для закона тепловыделения при термическом разложении смеси октогена с алюминием. Численное моделирование картины инициирования взрыва смеси выполнено в предположении физико-механического подобия процессов разрушения зарядов в методе РО и при обычных испытаниях ВВ на чувствительность к удару на копре. Анализ полученных временны́х зависимостей параметров растекающегося вещества показывает, что химическое взаимодействие между компонентами смеси активно проявляется при динамической разгрузке зарядов октогена с наноразмерными частицами алюминия и практически отсутствует в смесях с алюминием с частицами микронного размера.

Ключевые слова: сжатие, разрушение, разгрузка, истечение, разогрев, взрыв.

DOI: 10.31857/S0207401X22030050

ВВЕДЕНИЕ

Научно-методические и производственно-технические вопросы испытаний взрывчатых веществ (ВВ) на чувствительность к механическим воздействиями постоянно привлекают внимание специалистов по разработке и исследованию новых ВВ и взрывчатых составов [1, 2]. Относительно новый метод испытаний твердых ВВ [3], безударный по своей природе и известный как метод разрушающейся оболочки (РО), интересен тем, что построенный по результатам экспериментов ряд чувствительностей ВВ совпал с соответствующим рядом, полученным в опытах с ударом на копре по методу критических давлений (КД). Причем значения критических давлений инициирования ($P_{кр}$) по методу РО оказались приблизительно в 1.5 раза больше соответствующих копровых величин.

Напомним, что в методе РО испытываемое ВВ в насыпном виде помещается в зазор между плоскими поверхностями двух удлиненных роликов (пуансонов), которые вместе с зарядом вставляются в тонкостенную плексигласовую втулку (оболочку). Полученная испытательная сборка устанавливается вертикально между поршнем и траверсой гидропресса и далее нагружается давлением до разрыва оболочки. Давление в момент ее разрушения визуально фиксируется по показанию манометра пресса. Результат опыта (взрыв или отказ) зависит от давления нагрузки, массы заряда и толщины оболочки. Варьируя их величины, находят минимальное давление, при котором фиксируется взрыв и которое поэтому называется критическим. На практике часто ограничиваются лишь вариацией давления и массы заряда при постоянных размерах оболочки.

В отличие от метода КД при практическом использовании метода РО профиль спада давления не регистрируется. Поэтому до сих пор отсутствуют сведения о характере изменения толщины заряда и скорости разлета разрушенного вещества, которые необходимы для расчета температурного поля в заряде, координаты и времени возникновения взрыва. Без этих данных все рассуждения о механизме инициирования ВВ в методе РО представляются малоубедительными.

В настоящей работе выполнен приближенный теоретический анализ механической картины разрушения заряда в методе РО, на основе которой рассчитаны параметры инициирования смесей октогена с алюминием и уточнена формулировка [4] причины взрыва по механизму химического взаимодействия компонентов смеси при разрушении оболочки заряда.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗРЫВА СМЕСИ ОКТОГЕНА С АЛЮМИНИЕМ

В экспериментах, приведенных в работе [4] использовался мелкокристаллический октоген с размером частиц 10–30 мкм и порошки алюминия со средним размером частиц 7 и 0.1 мкм, которые для краткости обозначим как Al(7) и Al(0.1). Известно [5, 6], что твердые частицы алюминия способны сенсибилизировать заряды октогена при ударе на копре вследствие их высокого фрикционного разогрева в момент разрушения заряда. Поэтому для расчетов показателей чувствительности смесей октогена с алюминием по методу РО должное внимание следует уделить разработке фрикционно-механической модели поведения смеси и определению ее теплофизических и термохимических характеристик.

1. Тепловыделение в смеси

Сведения о теплотах взрывчатого превращения смесей октогена с алюминием получим, используя данные работы [7], в которой экспериментально с помощью детонационного калориметра определены значения Q в зависимости от состава смесей, определяемого содержанием α алюминия. Путем статистической обработки данных [7] найдем приближенную интерполяционную зависимость $Q(\alpha)$ в МДж/кг для смесей из порошков средней дисперсности в виде

$$Q(a) = \begin{cases} 5.52(1 + 3.2\alpha - 3.5\alpha^2 + 2.5\alpha^3 - 37\alpha^4 - 25\alpha^5 + 170\alpha^6 - 95\alpha^7), & 0 \le \alpha \le 0.5, \\ 4.735[1 - 5(\alpha - 0.5) + 5(\alpha - 0.5)^2 + 3.5(\alpha - 0.5)^3], & 0.5 < \alpha \le 0.865, \\ 0, & 0.865 < \alpha \le 1. \end{cases} \quad (1)$$

2. Модель фрикционной частицы смеси

Разработанная в работе [5] модель воспламенения фрикционной частицы двухкомпонентной смеси при ударе, правильная по своему физическому содержанию, представляется “тяжеловатой” для проведения многочисленных расчетов типа установления зависимости $P_{кр}(\alpha)$. Упрощенный вариант пригодной для расчетов модели элементарной частицы смеси, состоящей из компонентов 1 и 2, представляется приблизительно таким: пусть сферическая частица 1 диаметром d_1 и плотностью ρ_1 окружена сферическим слоем вещества 2 с плотностью ρ_2. Если $\rho = [(1 - \alpha)/\rho_1 + \alpha/\rho_2]^{-1}$ – плотность смеси, то массовая концентрация 2-го компонента составляет $\alpha = 1 - \rho_1 d_1^3 / \rho d^3$. Отсюда получим в первом приближении размер d частицы бинарной смеси:

$$d = d_1[1 + \alpha\rho_1/(1 - \alpha)\rho_2]^{1/3}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что $d \to d_1$ при $\alpha \to 0$, но $d \to \infty$ при $\alpha \to 1$, что, естественно, для последующих расчетов неприемлемо. Повторяя вышеприведенные рассуждения для частицы 2, окруженной слоем вещества 1, получим второе приближение для диаметра элементарной частицы смеси:

$$d = d_2[1 + (1 - \alpha)\rho_2/\alpha\rho_1]^{1/3}. \quad (3)$$

Здесь $d \to \infty$ при $\alpha \to 0$. Чтобы избежать неопределенностей для d на концах интервала $\alpha \subseteq (0, 1)$, приравняем (2) к (3), определяя таким образом равновозможную для d_1 и d_2 концентрацию смеси $\alpha_c = [1 + \rho_1 d_1^3 / \rho_2 d_2^3]^{-1}$, и окончательно запишем

$$d(\alpha) = \begin{cases} d_1[1 + \alpha\rho_1/(1 - \alpha)\rho_2]^{1/3}, & 0 \le \alpha \le \alpha_c, \\ d_2[1 + (1 - \alpha)\rho_2/\alpha\rho_1]^{1/3}, & \alpha_c < \alpha \le 1. \end{cases} \quad (4)$$

Далее будем считать, что формула (4) определяет размер элементарной частицы смеси, которая обладает всеми ее физико-механическими свойствами – плотностью, теплоемкостью и теплопроводностью – величинами, аддитивными по компонентам 1 и 2, теплотой взрывчатого превращения, определяемой формулой (1), прочностью на сжатие [5]

$$\sigma(\alpha) = \sigma_1\{[1 + \alpha\rho_1/(1 - \alpha)\rho_2]/[1 + \alpha\rho_1\sigma_1/(1 - \alpha)\rho_2\sigma_2]\}. \quad (5)$$

Но при этом термоактивационные характеристики частицы (E и Z) будут определяться характеристиками октогена в предположении, что алюминий не влияет на закономерности его терморас-

пада, что, несомненно, является весьма сильным предположением.

Отметим, что выполнению перечисленных выше требований к частице смеси способствует то обстоятельство, что время ее прогрева $\sim d^2/\chi$ ($\chi = \lambda/C\rho$ – температуропроводность частицы смеси) $\approx (10^{-5})^2/2 \cdot 10^{-5} = 5 \cdot 10^{-6}$ с (специальный рассчет для наиболее крупных частиц смеси) много меньше характерного времени разрушения заряда, составляющего несколько десятков микросекунд.

С введением понятия об элементарной частице смеси заметно упрощается вывод уравнений ее движения и энергии. В частности, уравнение теплового баланса на фрикционном контакте частицы и пуансона в квазиадиабатическом приближении запишется в виде

$$(\pi d^3/6)C\rho\, dT/dt = \pi d^2\omega\sigma(\alpha)wr_0\,(h_0/h)^{1/2}/2\sqrt{3}h, \quad (6)$$

где $\omega = \{1 + [\lambda_p C_p \rho_p/\lambda C\rho]^{1/2}\}^{-1}$ – коэффициент распределения тепловых потоков на фрикционном контакте стальной пуансон (нижний индекс "p") – ВВ, $w = -dh/dt$ – скорость осевого сжатия заряда толщиной h, r_0 – начальная координата пробной (лагранжевой) частицы смеси. Подставляя в (6) значение σ, взятое из зависимости силового сопротивления слоя ВВ осевому сжатию $P_0 \approx 2\sigma R/3\sqrt{3}h_0$, найдем величину подъема температуры частицы на контакте:

$$\Delta T = [18\omega P_0 h_0 r_0/(C\rho Rd)][(h_0/h)^{1/2} - 1].$$

Здесь P_0 и h_0 – давление и толщина заряда в момент начала разрушения оболочки. Полагаем, что в смесях октогена с алюминием ведущей стадией взрывного превращения является распад октогена. Тогда при одинаковых (в среднем) временах разрушения и взрыва смесевых зарядов температуры начала распада октогена также должны быть приблизительно одинаковыми. Отсюда следует, что в критических условиях инициирования исследуемых зарядов приближенно должно выполняться гиперболическое соотношение $P_0 h_0 \approx \text{const}$. Полученное выражение облегчает формулировку начальных условий задачи о построении зависимости $P_{\text{кр}}(\alpha)$, поскольку экспериментальные значения h_0, полученные по методу РО, в работах [3, 4] отсутствуют.

3. Механика испытаний и моделирование взрыва

Представляется очевидным, что непосредственно перед разрушением оболочки система нагружения пресса и испытательный прибор по механическому поведению аналогичны сжатой пружине с энергией E_0. С момента разрушения оболочки сжатая взрывчатая смесь, свободная от боковой поддержки оболочкой, начинает деформироваться в осевом направлении распрямляющимися пуансонами и, соответственно, растекаться вдоль радиуса прибора. Возникшая картина радиально-осевого течения вещества в целом представляется аналогичной той, которая проявляется в процессе разрушения ВВ при ударе на копре, когда достигаются условия механической прочности заряда [8]. В работе [5] получены уравнения, описывающие динамику вязкопластического течения, объемно-диссипативного разогрева и локального теплового воспламенения заряда ВВ в критических условиях удара. Воспользуемся этими уравнениями для описания процесса возбуждения взрыва в смеси октогена с алюминием при инициировании заряда октогена по методу РО с учетом того, что основную роль в диссипативном разогреве ВВ играет сухое трение элементарных частиц смеси на контактных поверхностях пуансонов:

$$dh/dt = -w, \quad dP/dt = (k/S)(v - w),$$
$$dv/dt = -PS/M,$$
$$P(0) = P_0, \quad h(0) = h_0, \quad v(0) = 0, \quad (7)$$
$$dw/dt = (8h/\rho R^2)[P - 2\sigma R/(3h\sqrt{3}) -$$
$$- 3\mu w/h] - 3w^2/2h, \quad w(0) = 0,$$
$$dT/dt = 3\omega[\sigma(\alpha) + 3\mu w/h]wr_0\,(h_0/h)^{1/2}/(hdC\rho) -$$
$$- 6\alpha_0\,(T - T_0)/(dC\rho) + QZW(t)/C, \quad T(0) = T_0,$$
$$d\eta/dt = ZW(t), \quad \eta(0) = 0,$$
$$W(t) = (1 - \eta)\exp(-E/R_g T).$$

Здесь M – масса испытательного прибора, механическая жесткость которого характеризуется константой k; α_0 – коэффициент теплообмена между зарядом и контактной поверхностью пуансона; η – относительная концентрация продуктов распада ВВ; R_g – газовая постоянная. Полагаем, что терморапад ВВ протекает по закону химической реакции 1-го порядка с аррениусовской зависимостью константы скорости от температуры.

Система уравнений (7) с учетом выражений (1), (4), (5) интегрировалась численно при следующих условиях:

1) сжатие заряда пуансонами сопровождается его деформационным разупрочнением до полной потери несущей способности ($\sigma_k = 0$), фрикционным разогревом частиц и пластическим разогревом заряда в целом. Полагаем, что в состоянии текучести реологические характеристики ВВ зависят от температуры и давления следующим образом:

$$\sigma = \sigma_0(1 - \varepsilon/\varepsilon_k)^s,$$
$$\mu = \mu_0 \exp[(-U/R_g)(1/T_0 - 1/T) + \beta P],$$

где $\varepsilon = (h_0 - h)/h_0$ – осевая деформация заряда, ε_k – предельная деформация, β – пьезомодуль

Таблица 1. **Параметры инициирования зарядов из смеси октогена с алюминием**

α	d, мкм	E_0, Дж	P_0, ГПа	h_0, мм	σ_0. МПа	μ_0, кПа · с	t_k, мкс	w_m, м/с	T_i, К	T_k, К	$(e_i)_k$, Дж
0	30	2.38	1.0	0.50	125	0.82	36.3	38.0	695	896	1.93
0.2	30/7	1.72	0.85	0.85	150	27.1	79.2	4.02	670	888	1.07
0.3	30/0.1	0.77	0.57	1.31	165	2.84	99.8	0.31	670	885	0.15

Примечание: сборка из заряда и пуансонов помещена в плексигласовую оболочку с толщиной стенок 1.5 мм; для дробных чисел d указаны размеры частиц октогена (в числителе) и алюминия (в знаменателе).

плавления, U – активационный параметр текучести, γ – пьезокоэффициент вязкости, показатель степении $0 < s \le 1$;

2) критические условия взрыва определяются вариацией различных параметров задачи (главным образом, P_0, h_0, r_0, μ_0), но регистрируются только при снижении P до нуля в конечный момент времени t_k; воспламенения при $t > t_k$ вследствие их неспособности привести к развитию взрыва в заряде ВВ считаются отказами;

3) взрывная реакция начинается в тот момент времени разрушения заряда, когда температура в горячей точке на 1 K превышает температуру в таком же по физико-механическим свойствам заряде, изготовленном из химически инертного вещества;

4) полноценное воспламенение фиксируется при $\eta_k = 1$, пробная частица при $t = t_k$ не должна выходить за пределы контактной поверхности пуансона ($r_k < R$);

5) все рассматриваемые взрыво-механические процессы прекращаются при $t > t_k$ и далее не рассматриваются.

В расчетах использовались следующие физико-химические характеристики октогена: $Q_0 = 5.5$ МДж/кг [9], $C = 1.05$ кДж/(кг · K), $\rho = 1.9$ кг/дм^3, $\lambda = 0.12$ Дж/(м · с · K), $E = 188$ кДж/моль, $\lg(Z)$, с$^{-1} = 16$ [10]. Для алюминия использованы табличные значения: $C = 0.88$ кДж/(кг · K), $\rho = 2.7$ кг/дм^3, $\lambda = 209$ Дж/(м · с · K). В табл. 1 и на рис. 1–5 представлены полученные результаты расчетов. Для всех ВВ приняты одинаковыми значения следующих параметров: $U = 20$ кДж/моль, $\gamma = 5$ ГПа$^{-1}$ · $M = 0.35$ кг, $k = 81$ МН/м, $\alpha_0 = 10^3$ Дж/(м^2 · с · K), $\varepsilon_k = 0.23$, $s = 0.7$.

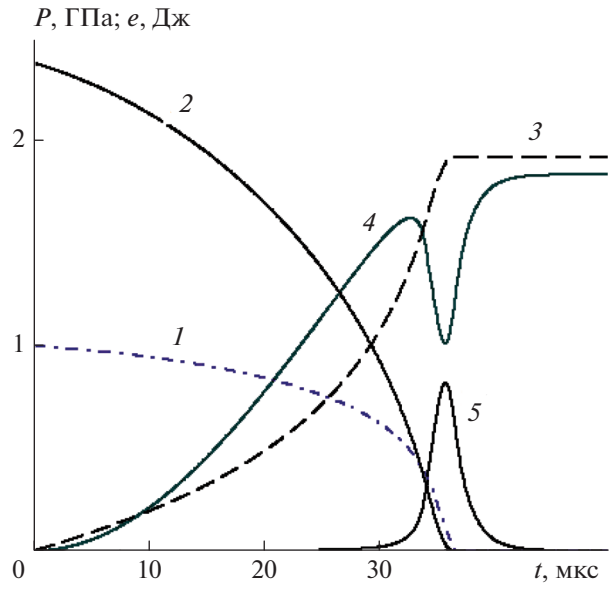

Рис. 1. Изменение видов энергии и давления в разрушаемом заряде октогена во времени: *1* – давление P, *2* – упругая энергия e_e, *3* – внутренняя энергия e_i, *4* – кинетическая энергия e_{k1} системы нагружения, *5* – кинетическая энергия e_{k2} радиального потока вещества.

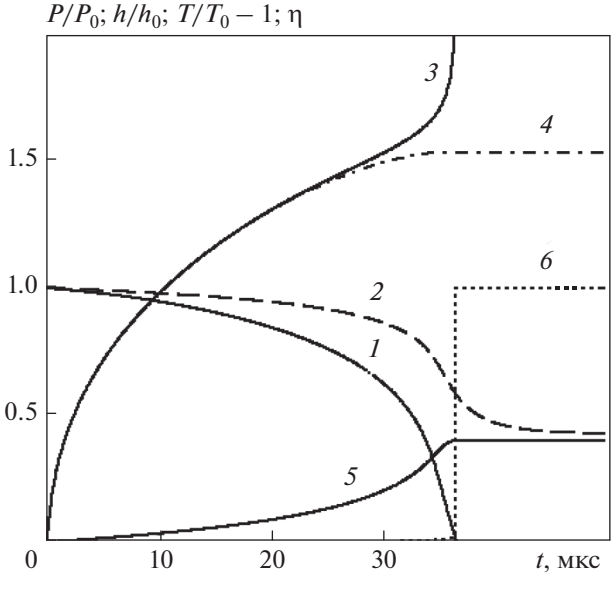

Рис. 2. Зависимость от времени параметров растекающегося заряда октогена: *1* – давление P, *2* – толщина h, *3* – температура T в горячей точке, *4* – температура в горячей точке для инертного аналога октогена, *5* – средняя температура заряда, *6* – относительная концентрация η продуктов распада октогена в горячей точке заряда.

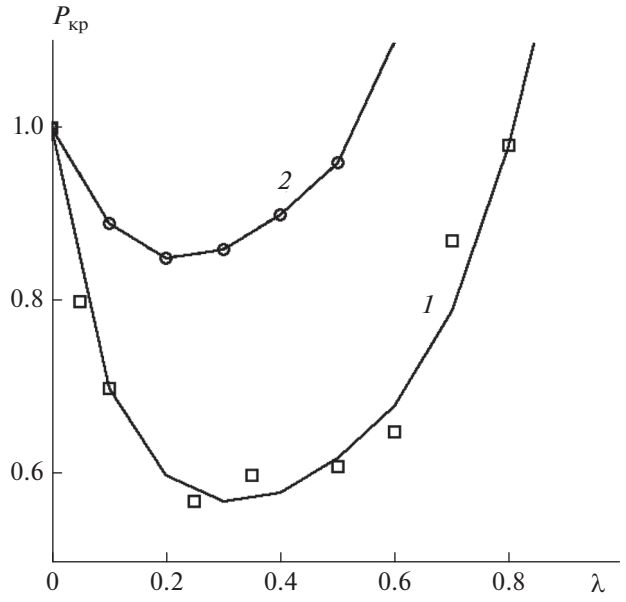

Рис. 3. Критическое давление инициирования смесей на основе октогена в зависимости от содержания алюминия (α): кривая *1* – A(0.1), кривая *2* – A(7). Значки – данные эксперимента [4].

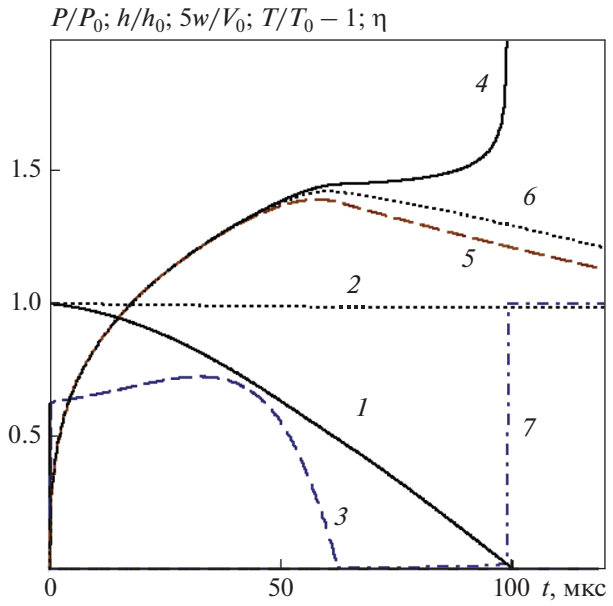

Рис. 4. Зависимость параметров потоков в смеси октоген–A(0.1) 70/30 от времени разрушения заряда: *1* – давление P, *2* – толщина h, *3* – скорость осевого сжатия w, *4* – температура T в горячей точке, *5* – температура в горячей точке для инертного аналога октогена в смеси, *6* – то же при отсутствии химического взаимодействия между компонентами смеси, *7* – относительная концентрация η продуктов распада смеси в горячей точке заряда.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прежде всего отметим, что с момента разрушения оболочки испытательного прибора система нагружения пресса трансформируется в колебательную систему с характерными частотой $(k/M)^{1/2}$ и скоростью $V_0 = P_0S/(Mk)^{1/2}$. Причем в первый период колебаний, во время которого происходят разрушение и выброс заряда, система стремится занять состояние полной разгрузки, испытывая деформационное “расширение”. При этом плоские торцы пуансонов по закону сохранения импульса в прессовой системе нагружения сдвигаются разнонаправлено: контактная поверхность сжимает заряд со скоростью w, а обращенный к поршню (траверсе) торец пуансона движется со скоростью системы $-v$. Значения указанных скоростей существенно зависят от реологических характеристик исследуемых смесевых составов.

На рис. 1 представлены графики изменения различных видов энергиии в критических условиях инициирования заряда октогена ($P_0 = 1.0$ ГПа, $h_0 = 0.5$ мм): упругой энергии $e_e = P^2S^2/2k$ (кривая *1*), внутренней энергии заряда $e_i = S\int Pwdt$ (кривая *2*), кинетической системы нагружения $e_{k1} = Mv^2/2$ (кривая *3*), включая энергию растекающегося заряда $e_{k2} = mu^2/2$ (кривая *4*), где радиальная компонента скорости $u = wR/2h$ и $m = \rho_0Sh$ – масса заряда. Сумма всех видов энергии остается постоянной в течение всего времени наблюдения и равна $E_0 = P_0^2S^2/2k = 2.38$ Дж.

Из рис. 1 следует, что большая часть запасенной в прессовой системе нагружения энергии E_0 затрачивается на увеличение внутренней энергии разрушающегося заряда (к моменту взрыва $e_i = 0.83E_0$), остальная часть расходуется на кинетическую, которая непрерывно перераспределяется между энергиями системы нагружения и заряда. Большой отток энергии на рост e_i позволяет судить о том, что инициирование ВВ по методу РО является эффективным способом возбуждения взрыва, поскольку увеличение внутренней энергии означает высокий подъем температуры заряда, особенно в его горячих точках. Этот вывод представляется закономерным, поскольку разрушение ВВ сопровождается высокой скоростью осевого сжатия заряда (ее максимум составляет $w_m = 38$ м/с), интенсивной деформацией продуктов разрушения (градиент скорости сжатия достигает $2 \cdot 10^4$ с$^{-1}$) и большим диссипативным разогревом вещества (максимальный подъем средней температура заряда ВВ составляет 410 K).

Характер изменения температуры в горячей точке заряда октогена показан на рис. 2. При указанных выше параметрах инициирования заряда

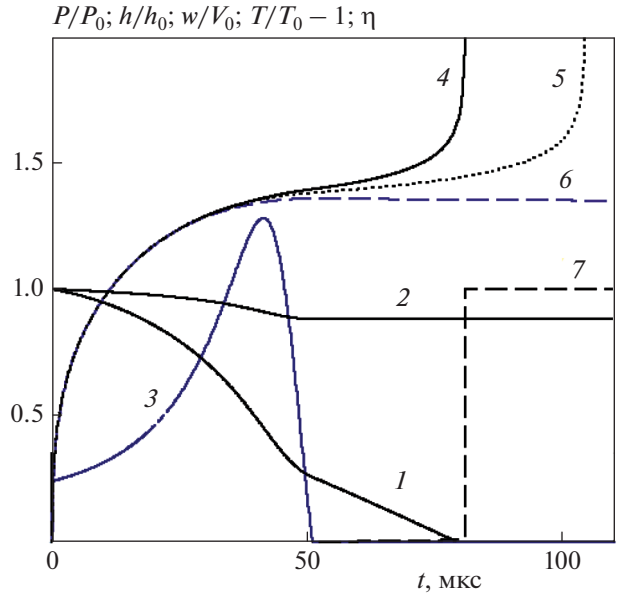

Рис. 5. Зависимость параметров потоков в смеси октоген–А(7) 80/20 от времени разрушения заряда. Обозначения те же, что и на рис. 4.

взрывы при $t = t_k$ фиксируются в узком диапазоне значений r_0: $0.18 < r_0 < 0.21$ мм, т.е. при начальном расположении горячей частицы вблизи оси заряда, где давление максимально. В противном случае взрывы возникают только при $t > t_k$.

Следует отметить, что хотя к моменту взрыва (t_k = 36.0 мкс) заряд полностью разупрочнился ($\sigma_k = 0$), толщина его благодаря высокой вязкости вещества ($\mu_k = 0.20$ кПа · с) оставалась еще весьма значительной ($h_{k\eta}$ = 0.29 мм). Большая толщина остаточного слоя октогена благоприятствует развитию в нем взрыва из очага инициирования.

Наряду с температурной кривой в горячей точке заряда октогена штриховой кривой на рис. 2 показано изменение температуры в заряде такого же по физико-механическим свойствам инертного вещества. Видно, что признаки реакции термораспада в реальном октогене появились в момент времени, соответствующий 22.4 мкс, при температуре $T_i = 694$ K ($\eta_1 = 1.9 \cdot 10^{-4}$) и локальном давлении 2.24 ГПа (среднее давление P составляло в этот момент 0.81 ГПа). Далее химическая реакция развивалась в течение 13.6 мкс и завершилась взрывом октогена при $T_k = 885$ K, $\eta_k = 0.03$ и $P_k = = 60$ МПа.

Приведенные термокинетические параметры взрывного инициирования октогена хорошо коррелируют с результатами расчета характеристик возбуждения взрыва в заряде октогена при ударе на копре [5]. За исключением величины критического давления инициирования $P_{кр}$, которое по методу РО в 1.47 раза больше, чем при копровых испытаниях [3]. Это различие критических давлений можно приближенно объяснить, если считать ответственным за инициирование ВВ наличие запаса энергии в механической системе нагружения – копровой (далее – с индексом “1”) и гидропресса (индекс “2”). Составим условие равенства упругих энергий, дополнив его запись соответствующими коэффициентами отбора ν, реально свидетельствующими о величинах внутренних составляющих полных энергий разрушенных зарядов: $P_1^2 S_1^2 n_1 / 2k_1 = P_2^2 S_2^2 n_2 / 2k_2$. Полагая $S_1/S_2 = 4/1$, $k_1/k_2 = 0.25/0.08$, $\nu_1/\nu_2 = 0.3/0.8$ [5], найдем для октогена значение отношения $P_2/P_1 = 1.39$, близкое к экспериментальному значению.

Описанная выше картина РО-инициирования октогена в целом присуща и алюминизированным смесям на его основе. Однако имеются различия, связанные со значительным изменением физико-механических и теплофизических характеристик смесевых систем. При увеличении содержания алюминия в смеси прочность зарядов возрастает незначительно, но существенно увеличивается их пластическая вязкость (для смесей с Al(0.1) она возрастает на два порядка величины). В результате снижаются уровень деформационного разупрочнения зарядов и их компрессия (степень сжатия) при разрушении. Это обстоятельство приводит к уменьшению объемного (вязкопластического) разогрева зарядов и снижению роли соответствующего ему механизма инициирования взрыва. Однако отмеченный “флегматизирующий” эффект алюминизации заряда успешно компенсируется возрастанием роли фрикционного разогрева частиц алюминия при их скоростном скольжении вдоль контактных поверхностей пуансонов в результате разрушения заряда. Раскаленные частицы алюминия активно обмениваются теплом с окружающим октогеном, инициируя в нем реакцию термораспада.

В результате действия конкурирующих факторов (возрастающая в целом при локальных фрикционных разогревах температура на контактной поверхности и снижение деформируемости алюминизированных зарядов) на графике зависимости $P_{кр}(\alpha)$ появляется характерный минимум, который заметно углубляется и расширяется при уменьшении размера частиц алюминия. Этот результат есть следствие существенной поддержки тепловыделения, связанного с фрикционным механизмом инициирования взрыва, экзотермическим эффектом химического взаимодействия компонентов (или продуктов их первичного распада) в очагах медленно (в условиях пониженного давления) реагирующего вещества. Механизм взрыва вследствие химического взаимодействия компонентов (или продуктов их первичного распада), характерный для смесей типа окислитель–горючее [4], успешно функционирует в алюминизированных

составах вследствие высокой химической активности свежеобразованных поверхностей на частицах алюминия, образующихся при разрушении заряда и при различных силовых взаимодействиях частиц в радиальном потоке вещества. Очевидно, что протеканию реакций химического взаимодействия компонент смеси способствует многократное возрастание потенциально возможной площади контактно-реакционной поверхности в смеси при сокращении размеров составляющих ее частиц. На рис. 3 приведены экспериментальные [4] и рассчитанные по представленной теории зависимости $P_{кр}(\alpha)$ для смесей октогена с алюминием Al(7) – кривая *1* и Al(0.1) – *2*.

На рис. 4 представлены зависимости параметров потоков от времени при динамической разгрузке наиболее чувствительной смеси октоген/Al(0.1) состава 70/30. Из рис. 2 и 4 следует, что увеличение вязкости заряда приводит к почти трехкратному возрастанию времени разгрузки и многократному уменьшению скорости приложения нагрузки к смеси. Поэтому исследуемый смесевой заряд практически не разупрочняется, не деформируется и (в среднем) не нагревается (средняя температура заряда поднимается всего лишь на 2 K). Однако в начальный момент разгрузки вследствие резкого возрастания скорости сжатия в заряде создается сравнительно высокий локальный разогрев смеси в плоскости трения (начальное значение координаты пробной частицы $r_0 = 0.25$ мм). Через 40 мкс температура в горячей точке вследствие термораспада октогена поднимается до $T_i = 670$ K ($P_1 = 0.43$ ГПа, $\eta_1 = 1.3 \cdot 10^{-4}$), и далее начинается ее интенсивный рост вследствие протекания химических реакций взаимодействия продуктов взрыва октогена с алюминием, которые заканчиваются тепловым взрывом через следующие 60 мкс (кривая *1*), даже несмотря на эффект сильного охлаждения реагирующей смеси. Оно проявляется в виде заметного спада температуры в горячей точке смеси алюминия с инертным аналогом октогена (кривая *5* на рис. 4), приводящего к отказу взрыва. Отметим, что в отсутствие химического взаимодействия в реакционноспособной смеси, т.е. при $Q(\alpha) = Q_0$, взрыв также не возникает (кривая *6*). Не происходит он и при слабом (менее чем в 2 раза) увеличении коэффициента теплоотдачи от заряда к стальным роликам (пуансонам).

Введение среднедисперсного алюминия Al(7) в октоген не сильно влияет на определение его чувствительности по методу РО, снижая критическое давление инициирования в среднем лишь на 10%. На рис. 5 показано изменение параметров потоков в наиболее чувствительной смеси состава 80/20 в зависимости от времени разгрузки. Величина пластической вязкости этой смеси заметно меньше вязкости смеси с Al(0.1) и лишь втрое превышает вязкость самого октогена. В результате наблюдаются: сокращение в 1.5 раза (по сравнению с предыдущим расчетом) времени разгрузки системы нагружения; эффект значительного разупрочнения заряда (характерный излом на кривой зависимости $P(t)$ свидетельствует о прекращении сжатия смеси); увеличение диссипативного нагрева вещества (средняя температура ВВ достигает 326 K). Это способствует тому, что тепловые процессы в горячей точке заряда существенно отличаются от аналогичных процессов в предыдущем примере. Кривая температуры *4* до взрыва практически совпадает с температурной кривой *6* для смеси с инертным аналогом октогена. Более того, при условии $Q(\alpha) = Q_0$, т.е. в отсутствие межкомпонентного химического взаимодействия, взрыв также имеет место (кривая *5*), но с несколько увеличенной (на 20 мкс) задержкой по сравнению с расчетами для смеси с реакцией. Взрывы смеси наблюдаются и при увеличении на порядок значения коэффициента теплообмена α_0, но они происходят уже с несколько более высокой задержкой.

Таким образом, из полученных данных о поведении смесевых составов на основе октогена при разгрузке по методу РО следует, что в случае компоновки составов нанодисперсным алюминием реакциями химического взаимодействия компонентов активно поддерживается термораспад октогена, вызванный фрикционными процессами на контактных поверхностях заряда (критическое давление инициирования смеси снижается почти вдвое по сравнению с чистым октогеном). В случае компоновки рассматриваемых составов средне- или крупнодисперсным алюминием поддержка распада ВВ за счет тепловыделения при химическом взаимодействии представляется весьма слабой (критические давления снижаются не более чем на 15%). Причем возникновение взрыва в этом случае объясняется высоким сенсибилизирующим эффектом твердых частиц алюминия, выполняющих своеобразную роль “поджигателя” октогена в потоке фрагментов разрушенного заряда.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен приближенный теоретический анализ метода испытаний твердых ВВ на чувствительность к механическим воздействиям, основанного на явлении взрыва при резком снятии высокой силовой нагрузки к исследуемому заряду.

2. С помощью численных экспериментов, выполненных в соответствии с математической моделью поведения зарядов при разгрузке, установлены значения критических параметров инициирования ВВ – давления, скоростей сжатия и разлета вещества, диссипируемой температуры, задержи взрыва и его местоположения в заряде.

3. Показано, что инициирование взрыва металлизированных ВВ связано с преобразованием части упругой энергии, запасенной в системе нагружения, в тепловую на контактных плоскостях испытательного прибора при фрикционном движении фрагментов разрушения заряда.

4. В смесях октогена с наночастицами алюминия инициирование взрыва происходит по комбинированному механизму следующего типа: фрикционный разогрев и активация частиц алюминия – медленный термораспад октогена – быстрое химическое взаимодействие компонентов ($P_{кр} \approx 0.45$ ГПа), в смесях со средне- и крупнодисперсным алюминием взрыв в основном сенсибилизируется фрикционно разогретыми частицами металла, поджигающими октоген ($P_{кр} \approx 0.85$ ГПа). Взрыв в октогене возбуждается при $P_{кр} = 1.0$ ГПа.

Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение госзадания по теме 44.8 “Фундаментальные исследования процессов превращения энергоемких материалов и разработка научных основ управления этими процессам” (регистрационный номер АААА-А17-117040610346-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гудкова И.Ю., Зюзин И.Н., Лемперт Д.Б.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 3. С. 53.
2. *Назин Г.М., Корсунский Б.Л.* // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 3. С. 53.
3. *Щетинин В.Г.* // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35. № 5. С. 116.
4. *Теселкин В.А.* // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 8. С. 43.
5. *Дубовик А.В., Понафидин Р.В.* // Горение и взрыв. 2018. Т. 11. № 4. С. 68.
6. *Дубовик А.В., Дмитриев Н.В., Леонтьев В.О.* // Горение и взрыв. 2019. Т. 12. № 1. С. 117.
7. *Махов М.Н.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 9. С. 71.
8. *Афанасьев Г.Т., Боболев В.К.* Инициирование твердых взрывчатых веществ ударом. М.: Наука, 1968.
9. *Пепекин В.И., МИахов М.Н., Лебедев Ю.А.* // Докл. АН СССР. 1977. Т. 232. № 4. С. 852.
10. *Манэлис Г.Б., Назин Г.М., Рубцов Ю.И., Струнин В.А.* Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов. М.: Наука, 1995.